

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.7>

УДК 681.51.538.8

## СВЧ – ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

В. М. Гаврилов, Л. Т. Сушкова

Владимирский государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ),  
600000 г. Владимир, ул. Горького, 87

Статья поступила в редакцию 13 января 2021 г.

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются три актуальные медико-экологические проблемы, для решения которых используются СВЧ-технологии. Первая задача связана с влиянием магнитного поля на организм человека. При этом особое внимание уделяется его дефициту, что приводит к нежелательным последствиям и необходимости коррекции. Вторая задача связана с диагностикой и терапией опухоли головного мозга. Приведены результаты исследований возможности виртуальной микроволновой диагностики отека головного мозга с использованием программного компонента CST MS 2013 на компьютерном фантоме головы человека с физически точными электродинамическими параметрами биологических тканей и показана ее эффективность, в том числе на ранних стадиях заболевания. Кроме того, рассмотрена возможность локальной гипертермии новообразований в головном мозге с помощью сфокусированного электромагнитного поля. В качестве фокусирующей системы использовалась композиция кольцевых антенных решеток с общим геометрическим фокальным центром. Представлены результаты компьютерного моделирования с использованием электродинамической модели головы человека, подтверждающая эффективность метода на начальных стадиях раковых заболеваний. Третья задача связана с оценкой электромагнитной обстановки в городском районе с целью выявления участков с уровнями поля, превышающими санитарно-допустимые нормы. Электродинамический расчет распределения поля в зоне городской застройки, представленной трехмерной компьютерной моделью, проводился с помощью программы «FEKO».

**Ключевые слова:** дефицит и коррекция магнитного поля, постоянные магниты, компьютерное моделирование, виртуальная СВЧ диагностика, компьютерная модель головы человека, локальная гипертермия, кольцевая антенная решетка, ПО «FEKO», зона городской застройки, уровень напряженности поля.

**Abstract.** This article discusses three current medical and environmental problems that use microwave technologies to solve. The first task was related to the influence of the magnetic field on the human body. At the same time, special attention was paid to its deficiency, which leads to undesirable consequences and the need for correction. The second task was related to the diagnosis and therapy of brain tumors. The results of studies of the possibility of virtual microwave diagnostics of cerebral edema using the CST MS 2013 software component on a computer phantom of the human head with physically accurate electrodynamic parameters of biological tissues are presented and its effectiveness is shown, including in the early stages of the disease. In addition, the possibility of local hyperthermia of neoplasms in the brain using a focused electromagnetic field is considered. The third task was related with assessment of the electromagnetic situation in the urban area in order to identify areas with field levels exceeding sanitary norms. Electrodynamic calculation of the field distribution in the urban development zone, represented by a three-dimensional computer model, was carried out on the base of the FEKO program.

**Keywords:** magnetic field deficit and correction, permanent magnets, computer modeling, virtual microwave diagnostics, computer model of the human head, local hyperthermia, ring antenna array, FEKO software, urban development zone, field strength level.

## **Введение**

Известно, что электромагнитные поля (ЭМП) и излучения (ЭМИ), как естественного, так и искусственного происхождения влияют на состояния живых систем и являются составной частью биотехносферы и, как следствие, важным экологическим фактором.

Основными биотропными параметрами ЭМП являются такие, как: частотный диапазон, глубина проникновения, вид модуляции, локализация, ориентация объекта относительно векторов E и H и др. Очевидно, что интенсивность антропогенных ЭМП в ближайшей перспективе будет нарастать, а количество людей, которые подвергаются их воздействию в окружающей среде и в процессе производственной деятельности, будет расширяться.

Считается доказанным, что биоэффекты ЭМП разной интенсивности реализуются в биообъектах посредством различных механизмов и могут накапливаться при повторных, длительных и хронических экспозициях. Под их действием может изменяться поведение человека, условно-рефлекторная деятельность, память, структура нервных клеток, биоритмологические процессы в организме, а при длительном контакте с ЭМП возникает снижение функциональных резервов головного мозга и организма в целом [1].

Анализ литературы показывает, что, несмотря на большое количество проводимых исследований, все еще существует большое разнообразие и противоречивость эффектов ЭМП на молекулярном, клеточном, органном, организменном и популяционном уровнях. Актуальной проблемой является и индивидуальное реагирование живого организма на ЭМИ, что объясняется разной чувствительностью организма к тем или иным биотропным параметрам электромагнитных полей [1].

В настоящее время одним из актуальных направлений научных исследований стало применение СВЧ-технологий для решения комплекса проблемных задач в медико-биологической практике, в т. ч.: диагностика, терапия и экология среды обитания человека. Энергетический эффект взаимодействия организма с ЭМП характеризуется удельной поглощенной мощностью (УПМ) и определяется, как правило, на тушках животных или фантомах, приближенных к биообъекту по форме и изготовленных из пластмассы с соответствующими физиологическими характеристиками.

В данной статье представлены результаты исследования трех актуальных биомедицинских задач, связанных с влиянием электромагнитных полей и

излучений на организм человека, в том числе проблема дефицита магнитного поля, а также применение СВЧ – технологий в медицинской диагностике наличия опухоли в головном мозге и последующей терапии.

Научные исследования в области применения СВЧ-технологий в медицине и экологии проводятся во Владимирском государственном университете с 1994г.. Этому способствовало открытие на радиотехническом факультете ВлГУ подготовки инженерных кадров медико-технического профиля и установление научно-практического сотрудничества с медицинским сообществом.

### **1. Синдром дефицита магнитного поля в городе**

Естественные магнитные поля сопровождают существование человека и предшествующих живых организмов миллионы лет. На разных временных этапах в зависимости от характера изменений магнитное поле способствовало или угнетало развитие биологического вида. В результате длительного отбора и адаптации появился современный человек, для которого существующие магнитные поля стали не только допустимым фоном, но и необходимым условием биологического выживания [2,3].

Наряду с этим, в теле человека имеется своё магнитное поле, возникающее вследствие протекания крови по сосудам. В разных органах оно может быть различно. В здоровом организме и в нормальных условиях имеется полное соответствие и взаимодействие внешнего и внутреннего магнитных полей. Резкое усиление внешнего магнитного поля, например, при магнитной буре или в активной геомагнитной зоне всегда отрицательно сказывается на самочувствии человека. Однако избыток магнитного поля – ситуация временная. Более опасным является его постоянный дефицит.

Пятьдесят лет назад известный японский учёный Накагава описал новую болезнь, которой страдает огромное количество людей на Земле и назвал её «синдромом дефицита магнитного поля человека». В результате его многочисленных исследований открылись возможности лечения большого количества заболеваний.

Главными проявлениями синдрома являются: общая слабость, повышенная утомляемость, сниженная работоспособность, плохой сон, головная боль, боли в суставах и позвоночнике, патология сердечно-сосудистой системы, гипер- и гипотония, нарушения пищеварения, кожные изменения, проблемы предстательной железы, гинекологические дисфункции и ряд других процессов. Конечно, дефицит магнитного поля не является единственной причиной указанных заболеваний, но составляет их весомую часть. Поэтому восстановление нормального магнитного присутствия в органах и системах человека ведёт к устранению важнейшей составной патологической цепочки и устраняет основу заболевания.

Механизм действия магнитного поля на живой организм заключается в том, что в состав крови, помимо других многочисленных компонентов, входят ионы металлов. Поэтому ток крови в сосудах приводит к образованию вокруг сосудов магнитного поля. Сосуды снабжают кровью абсолютно все участки тела. Следовательно, магнитное поле присутствует во всем организме. Уменьшение магнитного поля в окружающей среде приводит к нарушению магнитного поля в кровеносной системе, вследствие чего возникает нарушение кровообращения, а также транспортировки кислорода и питательных веществ к органам и тканям, что приводит к развитию болезни.

Считается, что дефицит магнитного поля может вполне соперничать с дефицитом витаминов и минералов по степени вреда наносимого им организму. Известно, что напряженность магнитного поля Земли меняется в значительных пределах. Например, в районе Киева она составляет 0,45Э, в приполярных районах 0,7 Э, в экваториальном поясе 0,1- 0,3 Э, а в Европе средняя величина напряженности магнитного поля на земной поверхности составляет 0,5 Э. На первом этаже типового железобетонного дома, вследствие изоляции от земной поверхности, напряженность магнитного поля не превышает 0,18 Э, а на десятом этаже меньше 0,018Э. В объемах, экранированных замкнутой ферромагнитной поверхностью и изолированных от Земли, она составляет порядка 0,01 Э [3].

Существующие санитарные правила и нормы устанавливают временно допустимые уровни ослабления геомагнитного поля (ГМП) в производственных условиях. Оценка и нормирование ослабления производится путем определения интенсивности геомагнитного поля внутри помещения и на прилегающей к нему территории, с последующим расчетом коэффициента ослабления ГМП, как отношение модуля вектора напряженности магнитного поля на прилегающей территории к модулю вектора напряженности магнитного поля на рабочем месте в помещении:

$$K_0^{\text{ГМП}} = \frac{|H_0|}{|H_B|},$$

где  $|H_0|$  – модуль вектора напряженности магнитного поля на прилегающей территории;  $|H_B|$  – модуль вектора напряженности магнитного поля на рабочем месте в помещении. Известно, что в помещениях в течение смены (8час.) на рабочих местах персонала временно допустимый коэффициент ослабления интенсивности геомагнитного поля не должен превышать 2.

Оценка и нормирование постоянного магнитного поля (ПМП) осуществляется по уровню магнитного поля дифференцированно в зависимости от времени его воздействия за смену для условий общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечья) воздействия. Уровень ПМП оценивается в единицах напряженности магнитного поля - А/м. В помещениях круглосуточного пребывания считается допустимым оптимальный уровень скорректированного ПМП порядка  $0,5 \text{ Э} = 39,79 \text{ А/м}$ .

Коррекцию дефицита магнитного поля целесообразно осуществлять в местах длительного пребывания людей (рабочие места, спальные помещения), путем создания искусственного магнитного поля с помощью постоянных магнитов. Современные технологии позволяют создавать постоянные магниты, конструктивно удобные для реализации поставленной задачи: тонкие металлические пластины, ферромагнитные пленки на подложке из гибких синтетических материалов.

Тем не менее, проблема дефицита магнитного поля в организме человека требует тщательного исследования и подробного анализа мер по проведению коррекции с целью обеспечения баланса магнитного поля для оптимальной жизнедеятельности человека [4].

## **2. Компьютерное моделирование СВЧ диагностики и терапии отека мозга**

В настоящее время одной из актуальных задач в медицине является обеспечение ранней диагностики возникновения отека мозга и, соответственно, своевременное принятие соответствующих терапевтических мер [5,6,7].

Результаты исследования указанных двух задач приведены в этом разделе.

**Задача 1.** Отек головного мозга (ОГМ) – это патологическое состояние, при котором происходит аккумуляция внеклеточной и/или внутриклеточной жидкости, что приводит к увеличению объема мозга и прогрессированию его функциональной несостоятельности. Основным патофизиологическим проявлением ОГМ является быстротечный рост внутричерепного давления (ВЧД). Если его вовремя и правильно не диагностировать, то в течение двух суток с момента начала развития возможен летальный исход.

Известно, что рентген не позволяет осуществить диагностику с необходимой степенью достоверности, ультразвук (УЛЗ) не применим из-за больших потерь в костной ткани черепа, а томография, вследствие аппаратных проблем, оказывается неприменима для оперативной диагностики вдали от специализированных центров. Поэтому актуальным является метод диагностики ОГМ с помощью СВЧ - излучения, а именно, дистанционная векторная СВЧ-скаттерометрия. При малом потоке мощности обследование может быть длительным и вполне безопасным. При этом важным вопросом СВЧ-диагностики ОГМ является выбор рабочей частоты.

В связи с этим, в данной работе в качестве перспективного метода диагностики ОГМ были исследованы ЭМВ СВЧ, которые характеризуются относительно малыми потерями при распространении в воздухе и в костных тканях и позволяют проводить безопасное для здоровья обследование в течение длительного времени при плотности потока мощности менее  $10 \text{ мкВт/см}^2$ .

Особенность решения поставленной задачи заключалась в необходимости обеспечения: достаточного разрешения (сопоставимого с длиной волны в среде) и значительной глубины проникновения, которая зависит от затухания ЭМП в биологических тканях. Кроме того, для надежного обнаружения и контроля состояния неоднородности желательно обеспечить большую проникающую способность ЭМИ, что предполагает использование низкочастотной части СВЧ-диапазона.

С другой стороны, для оценки положения и размеров отека мозга в голове человека (рассматривается как сферическая дифракционно-ограниченная система радиусом 1-5 см), желательно иметь высокое разрешение, что сопряжено с применением более высоких частот.

Проведенный совместный анализ зависимостей, противоположным образом зависящих от частоты для указанных видов тканей, позволил выявить характерную область, соответствующую диапазону частот с оптимальным соотношением пропускающей способности и пространственного разрешения, а именно: 0,3 - 3,5 ГГц.

Электродинамические параметры костной ткани и ткани мозга были взяты из справочного приложения программного комплекса *CST Microwave Studio 2013* (библиотека электродинамических параметров биологических тканей и органов человека). Возможность СВЧ диагностики отека мозга была проверена на виртуальной установке, компьютерная модель которой реализована в *CST MS 2013*. Схематично, виртуальная установка представляла собой два соосных оптимальных приемно-передающих конических рупора и компьютерный фантом головы человека в пространстве между двумя излучающими раскрытиями антенн. Диаметр излучающего раскрытия рупорных антенн имел величину  $\varnothing = 275$  мм.

Исследовалась электродинамическая модель головы человека со сфероидальным отеком. В процессе компьютерных исследований проводилась оценка элементов комплексной матрицы рассеяния по входам рупорных

излучателей в зависимости от объема отека. Электродинамические параметры жидкости в отечной области задавались равными  $\varepsilon = 81$ ;  $\sigma = 0,01$  См/м.

Предварительные исследования показали, что наибольшая чувствительность к объему отека обеспечивается на частоте 3,3 ГГц. На этой частоте были измерены диаграммы направленности рупорных излучателей (в ортогональных плоскостях были близки к  $20^0$ ). Коэффициент усиления был равен 20 дБ. С точки зрения разрешающей способности оптимальное расстояние между излучающими раскрытиями получилось близким к 950 мм.

Исследования показали, что при увеличении размера отека головного мозга модуль коэффициента отражения фактически линейно возрастает, а модуль коэффициента передачи линейно убывает. Более того, они чувствительны к изменению размеров отека. Таким образом, компьютерные исследования на физически достоверном фантоме головы человека показали высокую эффективность СВЧ-диагностики отека мозга. Причем:

- для обнаружения отека можно использовать как модуль коэффициента отражения, так и коэффициента передачи;
- отек радиусом до 2 мм (диагностика отека на ранних стадиях) диагностируется уверенно;
- зависимость фазы, а также коэффициентов отражения и передачи от радиуса отека являются наиболее чувствительными параметрами.

Исследования на компьютерной модели показали, что коэффициент отражения и коэффициент передачи, более чувствительны к изменению размеров отека мозга. Но, эти зависимости являются сложно анализируемыми, что затрудняет их использование для диагностики.

**Задача 2.** Локальная гипертермия рака головного мозга (ГМ) с помощью сфокусированного ЭМП. Исследовался перспективный способ фокусировки поля, связанный с использованием пространственных решеток излучателей, расположенных на поверхности второго порядка.

Наиболее просто подобная антенна реализуется на основе кольцевой ФАР, излучающей во внутреннюю часть окружности [6]. В этом случае, фокусировка

достигается за счет равенства электрических расстояний от излучателя до точки фокусировки, совпадающей с центром окружности. При этом возможно введение фазовращателей для коррекции электрических расстояний, которые могут возникнуть из-за дефокусирующих свойств биообъекта. Кроме того, такая система является принципиально широкополосной и может быть использована для радиометрических исследований.

В качестве примера рассмотрена кольцевая решетка вертикально ориентированных полуволновых вибраторов на частоте 100 МГц, радиусом 1,5 м, количество излучателей - 16. В центре кольцевой решетки располагался фантом головы человека. Электродинамические параметры биологических тканей (костной:  $\epsilon' = 15,3$ ,  $\epsilon'' = 11,5$ ; мозговой  $\epsilon' = 68,5$ ,  $\epsilon'' = 79,4$ ) задавались с помощью библиотеки материалов *CST MS 2013*. Пространство между поверхностью головы и решеткой заполнялось трансформирующим слоем ( $\epsilon = 69$ ). Мощность на входе каждого излучателя - 70 Вт.

Результат эксперимента показал, что удовлетворительные свойства достигаются в горизонтальной плоскости, расположенной перпендикулярно излучателям кольцевой ФАР. В вертикальной плоскости фокусирующие свойства существенно снижаются, а размеры фокальной области превышают размеры головы человека. Подтверждением данных рассуждений являются полученные результаты распределения температуры во внутренних тканях головы человека и окружающем пространстве.

Исследования показали, что в этой системе достигается высокая интенсивность поля, проникающего во внутреннюю область головы человека, и обеспечивается требуемый разогрев внутренних тканей. Однако, размеры сфокусированной области с необходимой областью температуры сравнимы с размерами головы, что не позволяет осуществить локальную гипертермию с требуемым разрешением.

Существенно более высокие фокусирующие свойства достигаются при использовании пространственной ФАР, которая образуется на основе двух

ортогонально расположенных кольцевых антенных решеток одинакового радиуса, имеющих общий геометрический центр.

Распределение температуры во внутренних тканях головы: мощность на выходе каждого излучателя полагалась равной 23,6 Вт. Необходимая для гипертермии температура ( $42,5^{\circ}\text{C}$ ) достигалась в локальном объеме головы размером меньше  $1\text{ см}^3$ .

Таким образом, задача локальной гипертермии во внутренних тканях, в том числе и в голове, может быть достигнута с помощью сферической ФАР с неполным заполнением. В частности, оптимальным оказался вариант сочетания двух ортогонально расположенных кольцевых решеток.

### **3. Электродинамическое моделирование электромагнитной обстановки в городе**

Прогнозирование уровней напряженности поля в зоне городской застройки является важным этапом оценки функциональных возможностей радиотехнических средств связи и вещания, а также экологических и санитарных исследований.

Вероятностные методы расчета и моделирования ЭМП в условиях города достаточно хорошо известны и отработаны для сетей ТВ и ОВЧ ЧМ вещания. Однако развитие теории и практики современных СВЧ средств связи стимулирует поиск новых более точных моделей, лучше соответствующих реальным условиям.

В данной работе рассматривается расчет электромагнитного поля в городских условиях методом физической оптики. При этом на поверхностях сложной формы (включая особенности типа клин, плавно изогнутая поверхность, острие и т. п.) использовался метод краевых волн. Окружающее пространство полагалось однородным. Расчеты проводились с помощью программы *FEKO v5.5*. [8,10]. Исследования проводились на частоте 28 ГГц с использованием трехмерной модели рельефа и застройки микрорайона.

Параметры земной поверхности задавались значениями:  $\epsilon=15$ ,  $\text{tg}\delta=0,06$ . Все строения полагались выполненными из бетона:  $\epsilon=4,5$ ,  $\text{tg}\delta=0,15$ , и, сохраняя

внешнюю форму зданий и сооружений, считались монолитными. Каждое здание описывалось комбинацией плоских поверхностей и линейных кромок.

В качестве передающей антенны использовался полуволновый вибратор, согласованный на частоте 28 ГГц не хуже  $K_{СВ} < 1.5$ . Вертикально ориентированный вибратор располагался в точке 1: на внешней кромке плоской крыши кольцевого корпуса высотой 15 метров с подвесом над поверхностью крыши 8 м. Мощность излучения задавалась равной 10 Вт. Распределение поля вычислялось в плоскости  $XOY$ , расположенной над земной поверхностью на высоте 1 м. Координаты излучателя на плоскости  $X=-310$  м,  $Y=270$  м. Результирующее поле в расчетных точках определялось суммой переотраженных и дифрагированных волн, возникающих на вертикальных и горизонтальных изломах. Полагалось, что пространственное затухание ЭМВ зависит только от расстояния до источника и обусловлено рассеянием волн в свободном пространстве.

Расчеты были выполнены на компьютере с параметрами: процессор *Intel Core I7*, видеокарта *GeForce GTX 210*, ОЗУ 32 ГГб. Длительность вычислений составила более 24 часов.

Для иллюстрации полученного распределения ЭМП в микрорайоне использовалась цветовая шкала интенсивности поля. Полученные результаты наглядно иллюстрировали экранирующее действие строений, а также дифракционные эффекты, обуславливающие появление поля в области тени.

В работе [9] приведены рисунки, иллюстрирующие зависимость поля от расстояния в двух ортогональных плоскостях параллельных  $xOz$  и  $yOz$  и проходящих через ось симметрии антенны.

Дифракционно сложный характер композиции естественных и искусственных объектов в области формирования ЭМП приводят к образованию сравнимых по интенсивности переотраженных и дифрагированных волн, и, как следствие, к сильно осциллирующему по амплитуде распределению поля в микрорайоне.

Характер распределения поля позволяет сделать заключение о возможности, в данном случае, достоверной априорной оценки распределения поля в зоне городской застройки только путем прямой электродинамической имитации с помощью компьютера на конкретной трехмерной модели городской застройки.

Полученный опыт и результаты моделирования с помощью программы *FEKO* могут быть использованы для экологической оценки среды обитания человека при разработке проектов сетей мобильной связи в современных промышленно - развитых центрах.

### **Заключение**

В настоящее время коммерческие компьютерные программы стали важным инструментом исследований в медико-экологической практике. В одной среде инструментов моделирования они позволяют исследовать различные биофизические процессы взаимодействия электромагнитного поля с биологическими объектами в задачах диагностики и терапии, в экологических задачах, связанных с электромагнитными процессами в естественных условиях. Электродинамическое моделирование, используемое в программных средствах, позволяет повысить качество и достоверность получаемых результатов.

Следует подчеркнуть, что совершенные программные средства не снижают сложность и научный уровень решаемых биомедицинских и экологических научно-технических задач, но видоизменяют их, акцентируя внимание на новых виртуальных объектах и их связи с реальными объектами, актуализируя задачи оптимизации путей решения более глубоких и сложных научных исследований.

### **Литература**

1. Суворов Н.Б. Некоторые проблемные вопросы электромагнитной экологии человека. *Биотехносфера*. 2009. №5,2009. С.38-44.
2. Пересман А.С. *Электромагнитные поля и живая природа*. Москва, Медицина. 1999. 21 с.
3. Сейфулла Р.Д. *Магнитное поле Земли и здоровье человека*. Москва, ООО «Самполиграфист». 2013. 120 с.

4. Гаврилов В.М. Синдром дефицита магнитного поля и его коррекция. *XIV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» – ФРЭМЭ' 2020*. Владимир – Суздаль. 2020. Т.2. С.292-294.
5. Улащик, В.С. *Введение в основы физической терапии*. Москва, Медицина, 1997. 238 с.
6. Ясногородский В.Г. *Электротерапия*. Москва, Медицина. 1996. 210 с.
7. Гаврилов В.М., Дементьев В.К., Шаманская Е.Л.. Компьютерное моделирование ВЧ-СВЧ диагностики и терапии. *XIV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» – ФРЭМЭ' 2020*. Владимир – Суздаль. 2020. Т.1. С.67-71.
8. Локшин М.Г., Шур А.А., Кокорев А.В., Краснощеков Р.А. *Сети телевизионного и звукового СВЧ ЧМ вещания*. Москва, Радио и связь. 1988.
9. Гаврилов В.М. Электродинамическое моделирование электромагнитной обстановки в городе. *XIV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» – ФРЭМЭ' 2020*. Владимир – Суздаль. 2020. Т.2. С.289-292.
10. Банков С.Е., Курушин А.А. *Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO*. Москва, ЗАО «НПП «Родник». 2009. 200 с.

**Для цитирования:**

Гаврилов В.М., Сушкова Л.Т. СВЧ - технологии в медико-экологической практике. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.7>